

УДК 664.8.047

ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС ОДЕРЖАННЯ КОМБІНОВАНИХ
КАРОТИНОВІСНИХ ПРОДУКТІВПетрова Ж.О.¹, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Граков Д.П.², аспірант¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: grakov.d@gmail.com<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.3>

У статті досліджено кінетику сушіння каротиновмісної комбінованої сировини на основі гарбуза та моркви за різних режимів зневоднення. Визначено, що комбіновані та ступеневі режими дають можливість скоротити процес сушіння майже в 1,5 – 2 рази зі збереженням кольору матеріалу. За результатами визначено, що оптимальні режими дають можливість зберегти високу кількість у каротиноїдів порошках. При цьому відбувається концентрація каротиноїдів у сухих порошках приблизно у 5 разів.

The paper investigates the drying kinetics of carotene-containing combined raw materials based on pumpkin and carrot under different dehydration regimes. It has been determined that combined and stepwise modes make it possible to reduce the drying process by almost 1.5-2 times while preserving the colour of the material. According to the results, it was determined that the optimal modes make it possible to preserve a high amount of carotenoids in powders. At the same time, the concentration of carotenoids in dry powders increases by about 5 times.

Бібл. 32, рис. 8, табл. 3.

Ключові слова: конвективне сушіння, інфрачервоне випромінювання, ефективні режими сушіння, каротиноїди, гарбуз, морква.

 W^c – вологість по відношенню до сухої маси, %; W – вологість по відношенню до загальної маси, %; u – вологовміст, кг вол./кг сух.речов.; τ – час, хв; V – швидкість теплоносія, м/с; δ – товщина шару, мм.**Вступ**

Постановка проблеми. Збереження енергоресурсів є одним із завдань людства сьогодні. Тому зменшення їх на процеси переробки є досить актуальним. При цьому до складних енергоємних технологічних процесів належить сушіння. Сушіння, мабуть, найдавніший і найважливіший метод збереження їжі та овочів, який практикує людина [1, 2]. Процес сушіння включає тепло- та масообмін [3 - 5]. Сушіння, тобто видалення води, запобігає росту та виробленню мікроорганізмів, що спричиняє гниття; це мінімізує руйнівні реакції, спричинені вологою [2]. Також процес призводить до суттєвого зменшення ваги та об'єму, мінімізуючи витрати на пакування, зберігання та транспортування, а також забезпечує можливість зберігання продукту за температури навколишнього середовища [6]. Під час сушіння відбувається багато змін, такі як структурні та фізико-хімічні модифікації, які можуть вплинути на якість

кінцевого продукту [1, 7]. Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, які забезпечують скорочення енергоносіїв на процеси сушіння та дозволяють зберігати мікро- та макроеlementи у сухому продукті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі вітаміни та біологічно активні речовини, які забезпечились без змін, в харчовій сировині називають функціональними інгредієнтами [8]. Харчові продукти, які повноцінні, збагачені або покращені функціональними інгредієнтами називають функціональними харчовими продуктами або нутрицевтиками та можуть сприяти здоров'ю, окрім основної функції забезпечення основними поживними речовинами [9, 10].

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено класифікацією основних рослинних

функціональних інгредієнтів, які залишилися у сухих продуктах: антиоксидантні, фітоестрогенні, фолатовмісні та пребіотичні.

Найбільш поширеними є антиоксиданти. Антиоксиданти — це молекули, які достатньо стабільні, щоб віддавати електрони вільним радикалам, зокрема кисню, в подальшому нейтралізують його, таким чином зменшуючи його здатність до окислення [11]. Вони також затримують або пригнічують клітинне пошкодження головним чином завдяки своїй властивості поглинати вільні радикали [12]. Деякі антиоксиданти, включаючи глутатіон, убіхінол і сечову кислоту, виробляються під час нормального метаболізму в організмі [13]. Інші більш легкі антиоксиданти містяться в їжі. Хоча в організмі існує кілька систем ферментів, які поглинають вільні радикали, основними мікроелементами (вітамінами) антиоксидантами є каротиноїди, вітамін Е (α -токоферол) і вітамін С (аскорбінова кислота) [14]. Організм не може виробляти ці мікроелементи, тому вони повинні надходити з їжею.

Значний потенціал для прогресу з антиоксидантів у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості продемонстрували каротиноїди, завдяки своїй багатій поживній цінності та функціональними властивостями [15, 16]. Каротиноїди, клас терпеноїдних пігментів, головним чином відповідають за яскраво-жовтий, помаранчевий і червоний кольори квітів і плодів рослин [17, 18]. Найбільш поширеними представниками каротиноїдів в Україні є гарбуз та морква.

Гарбуз (*Cucurbita*) є загальною назвою сезонних плодів даного роду. Попит на гарбуз зростає з кожним роком, головним чином тому, що він менш калорійний зі значним вмістом харчових волокон, полісахаридів, пектинів, каротиноїдів і флавоноїдних пігментів, які набувають все більшого значення завдяки своїй антиоксидантній активності, мінералів (калій, кальцій, магній, натрій, залізо), вітамінів (А, С, В1, В2, В9) та інших речовин, що сприяють зміцненню здоров'я [19 - 21]. Найважливішою перевагою гарбуза є його низька калорійність, що пов'язано, насамперед, з високим вмістом води, яка становить приблизно 80% від загальної кількості в рослині [22].

Морква (*Daucus carota* L.) — коренеплід, що має значну економічну та харчову цінності, широко культивується в усьому світі через багатий вміст вітамінів, мінералів, клітковини та антиоксидантів. Морква відіграє вирішальну роль у раціоні людини, забезпечуючи її необхідними поживними речовинами, та-

кими як бета-каротин, що перетворюється на вітамін А, який має вирішальне значення для зору, імунної функції та здоров'я шкіри [23]. Гарбуз та морква відносяться до сезонних продуктів та мають терміни зберігання, які можливо збільшувати завдяки консервуванню, а саме сушінню. Сушіння є одним із найстаріших, природним і доцільним способом консервування завдяки зниженню природної вологості та уповільненню процесів розвитку мікрофлори у сушених продуктах [16 - 25].

Авторами [26] у роботі розглянуто сушіння гарбуза та моркви у гібридній сушарці, яка використовує теплову енергію від сонячного випромінювання та гарячу воду, як підігрів дна камери. Сушіння відбувалось за температур 50, 60, та 70 °С. Ця технологія доцільна при сушінні в тропічному та субтропічному кліматі та за допомогою цього методу можна ефективно вирішити проблему сушіння в сезон дощів.

У роботі [27] розглянуто особливості сушіння та фізичні властивості шматочків гарбуза під час вібраційно-інфрачервоного, інфрачервоного та конвективного сушіння. Для досліджень були вибрані тайські гарбузи (*Cucurbita moschata*), які нарізали прямокутної форми розміром 2 см x 2 см x 0,5 см. При вібраційно-інфрачервоному та інфрачервоному сушінні для експериментів використовували різну інтенсивність інфрачервоного випромінювання 500Вт/м², 750Вт/м² і 1000 Вт/м².

Сушіння за допомогою вібраційно-інфрачервоного використовувало вібрацію зі швидкістю 750 об/хв, що є мінімально необхідним для перевертання шматочків гарбуза при рівномірному сушінні. Метод конвективного сушіння відбувався при температурі теплоносія 60°C і швидкістю 0,5 м/с.

Спосіб вібраційно-інфрачервоного сушіння продемонструвало найвищу швидкість сушіння (0,1 г води/г сухої речовини•хв) і найкоротший час сушіння (100 хв), при цьому ефективність сушіння залежала від інтенсивності інфрачервоного сушіння. Скибочки гарбуза, висушені в умовах вібраційно-інфрачервоного сушіння при середній інтенсивності ІЧ-променів 750 Вт/м², продемонстрували чудові властивості продукту. При цьому конвективне сушіння при низькій швидкості теплоносія має найнижчу тривалість процесу і становить 425 хв.

Авторами у роботі [28] виконані дослідження конвективного ротаційного та гібридно-ротаційного сушіння моркви (сорт Nantes) за допомогою мікрохвиль та ультразвуку за допомогою гібридної ротаційної сушарки.

Моркву промивали, очищали від шкірки та нарізали скибочками (товщиною 5 мм) за допомогою промислового кутера Hällde RG100 (Kista, Швеція). Було виконано 4 програми сушіння — один конвективний і три гібридні підходи. Дослідження оцінювало кінетику сушіння, споживання енергії та якість продукту. Використання ультразвуку збільшило швидкість сушіння на 13%, мікрохвиль на 112%, а мікрохвиль і ультразвук разом на 140%. Використання мікрохвиль зменшило споживання енергії на 30%, тоді як ультразвук призвело до незначного збільшення. Усі процеси призвели до значного зниження активності води. Ультразвук зменшив індекс різниці кольорів, тоді як мікрохвилі збільшили його порівняно з конвективним сушінням.

У роботі [29] було виконано дослідження якості зневоднених шматочків моркви та гарбуза, отриманих шляхом комбінованого сушіння з використанням часткового сублімаційного сушіння та сушіння гарячим повітрям. Загальний вміст каротиноїдів у двох овочах зазнав значного впливу параметрів сушіння. Деструкція каротиноїдів при зберіганні при різних температурах була меншою у зразках комбінованого сушіння. Овочі НАД показали усадку, затвердіння та погану регідратацію (25 та 28 хв у холодній воді, коефіцієнт регідратації 1:2,6 та 1:2,9 відповідно). Час сушіння та загальна енергія для обробки комбінованого сушіння були на 50% меншими, ніж для ліофілізованого, але подібні до висушених гарячим повітрям. Комбінований процес зневоднення є ефективним для отримання високоякісних сушених овочів.

Конвективне сушіння є одним кращих методів сушіння каротиновмісних матеріалів, але при цьому має переважно велику тривалість, яку для кращого збереження функціональних властивостей необхідно зменшувати. Тому метою роботи є дослідження комбінованих методів сушіння, для зменшення тривалості.

Матеріали та методи досліджень

Для збереження каротиновмісної складової були створені суміші на основі моркви та гарбуза. Тому для досліджень були використані гарбуз, морква, хурма та селера, які мили, натирали на промисловій овочерізці та змішували.

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [30].

В теорії сушіння вологість матеріалу зазвичай розраховується відносно маси абсолютно су-

хого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною, а також є зручною для розрахунків [31]. Перехід від вологості W^c , розрахований по відношенні до маси сухої речовини матеріалу, до вологості W , розраховано до зальної маси, простий.

Загальна маса вологого матеріалу (в кг):

$$q = q_{\text{вл}} - q_{\text{ср}},$$

де $q_{\text{вл}}$ — маса води, кг; $q_{\text{ср}}$ — маса сухої речовини, кг.

Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси обчислюють за формулою, %:

$$W = \frac{q_{\text{вл}}}{q} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100,$$

де m_1 — маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 — маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 — маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини розраховується за формулою, %:

$$W^c = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100,$$

де m_1 — маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 — маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 — маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Формули переходу, %:

$$W = \frac{W^c}{100 + W^c} \cdot 100,$$

$$W^c = \frac{W}{100 - W} \cdot 100,$$

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в кг вол./кг с.р., то отримаємо *вологовміст* (питомий масовміст) матеріалу [31]:

$$u = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$$

Результати дослідження

Перед процесом сушіння була проведена підготовка сировини, тобто створення суміші у співвідношенні 1:1, а саме гарбузово-хурмова та морквяно-селерна.

Поснавання моркви з селерою дає стабілізацію каротиноїдів навіть на початку процесу безгіротермічної обробки на 11 – 23%. Очевидно, вже під час подрібнення

та перемішування відбувається стабілізація каротиноїдів за рахунок жиру, ефірних масел селери, білків і вітаміну С. Моркву та суміш морвяно-селерну обробляли таким чином, тобто селеру перемішували разом з подрібненою морквою, а також подрібнену моркву, обробляли гострою парою. Розглядаючи динаміку втрат каротиноїдів під час гідротермічної обробки морквяно-селерної спостерігаємо таку ж залежність як і в моркві. Селеру також потрібно бланшувати для запобігання ферментативного Браунінга. Поліфенолоксидаза несе пряму відповідальність за ферментативне потемніння і тому її потрібно інгибувати парою.

У таблиці 1 приведені дані про зміну каротиноїдів від умов підготовки сировини до сушіння під час сушіння [32].

Сама гідротермічна обробка майже не руйнує каротиноїди (табл. 1), ці мінімальні втрати обумовлені механічним руйнуванням хромопластів на лінії розрізу паренхіми моркви.

Найбільші втрати каротиноїдів, як видно з рис. 1 без підготовки сировини до сушіння 44% (поз. 1). Існуюча технологія гідротермічної обробки (поз. 2) дає втрати до 25%. Розроблені нами режими бланшування моркви дозволили зменшити втрати каротиноїдів під час сушіння до 12% (поз. 3). Купажування каротиновмісної сировини та обробка парою протягом 5 хв дає можливість отримати найкращі результати при яких втрати становлять

4,4% (поз. 4). Отже, оптимальними умовами підготовки каротиновмісної сировини є купажування цієї сировини та обробка парою 5 хв. З огляду на те, що гідротермічна обробка відбувається з певними енерговитратами, немає сенсу збільшувати час обробки.

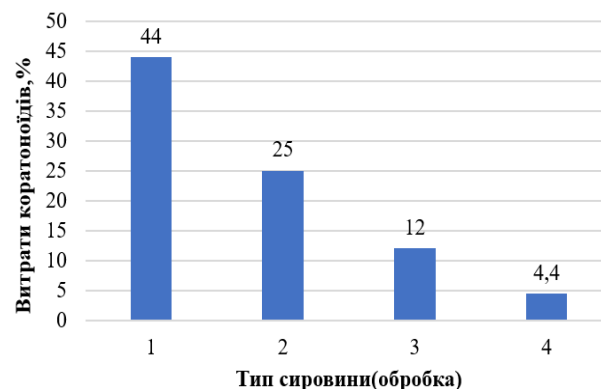


Рис. 1. Гідротермічна обробка антиоксидантної сировини: 1 – морква без гідротермічної обробки; 2 – існуюча технологія гідротермічної обробки моркви; 3 – гідротермічна обробка моно сировини; 4 – гідротермічна обробка селеро-морквяної сировини

Fig. 1. Hygrothermal treatment of antioxidant raw materials: 1 - carrots without hygrothermal treatment; 2 - existing technology of hygrothermal treatment of carrots 3 - hygrothermal treatment of mono raw materials; 4 - hygrothermal treatment of celery-carrot raw materials

Табл. 1. Підготовка антиоксидантної сировини до сушіння (гідротермічна обробка)

Table 1. Preparation of antioxidant raw materials for drying (hygrothermal treatment)

Сировина	Умови гідротермічної обробки		Втрати каротиноїдів, %	
	Час обробки, хв.	Температура обробки, °C	під час гідротермічної обробки	під час сушіння при температурі 70°C
Морква	0	—	—	44
	2	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,8 / 1,0	19,8 / 13,5
	3	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,7 / 2,1	11,0 / 12,1
	5	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,6 / 2,5	11,5 / 17,4
	7	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,7 / 3,6	15,6 / 26,9
	10	(пара 98°C) / (вода 98 °C)	0,8 / 3,8	25,5 / 35,4
Морквяно-селерна суміш	0	—	—	33,4
	2	(пара 98°C)	0,6	16,8
	3	(пара 98°C)	0,5	5,1
	5	(пара 98°C)	0,6	5,7
	7	(пара 98°C)	0,7	12,3
	10	(пара 98°C)	0,6	21,1

Гарбуз та суміш на його основі не бланшували, а досліджували в сирому вигляді.

Дослідження сушіння проводили до вологості матеріалу $7 \pm 1\%$. Для гарбуза та суміші на його основі товщинна шару дорівнювала 5 мм, а для моркви та суміші на її основі 10 мм.

На рисунку 2 представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння гарбуза. З рисунку 2 видно, збільшення температури теплоносія з 65°C до 100°C скорочує час сушіння гарбуза на 35%, а швидкість зростає в 1,5 рази. При цьому збільшення температури теплоносія до 100°C призводить до погіршення якості сушеного гарбуза, а саме потемніння матеріалу та підгорілий присмак.

Далі були виконані дослідження гарбузово-хурмяної суміші за режимами сушіння $65, 100, 100/65, ^\circ\text{C}$ та комбінованим $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$, швидкість теплоносія $3,0\text{ м/с}$.

На рис. 3 представлені зміна вологовмісту та температурні криві сушіння гарбузово-хурмяної суміші. Як видно з рисунку 2 найбільша тривалість сушіння у режиму 65°C та становить 131 хв. Найменша тривалість при 100°C та становить 73 хв, але при цьому матеріал має потемніння та пригорілий присмак.

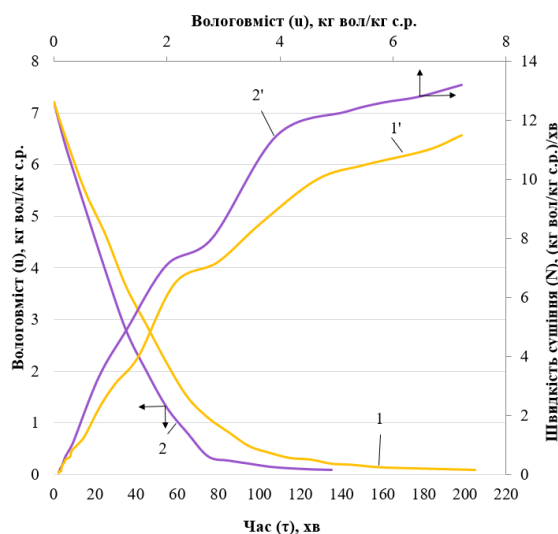


Рис. 2. Зміна вологовмісту (1, 2) та швидкості сушіння (1', 2') гарбуза в шарі $\delta \approx 5\text{ мм}$:

1 – 65°C , 3 м/с; 2 – 100°C , 3 м/с

Fig. 2. Changes in moisture content (1, 2) and drying rate (1', 2') of pumpkin in a layer $\delta \approx 5\text{ mm}$:

1 – 65°C , 3 m/s; 2 – 100°C , 3 m/s

Для ступеневого режиму $100/65^\circ\text{C}$ та комбінований $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$ на початку процесу матеріал доводили до температури 58°C , після чого зменшували температуру та вмикали інфрачервоні лампи для подальшого сушіння за температури 65°C . Ці режими мають нижчу тривалість порівняно з 65°C та становлять 118хв для $100/65^\circ\text{C}$ та 117 хв для $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$.

На початку дослідження за комбінованим режимом $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$ працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м^2 та теплоносії 65°C при після досягнення температури матеріалу 58°C вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до $50,7^\circ\text{C}$, далі вона підіймається до $64,36^\circ\text{C}$. За ступеневим режимом $100/65^\circ\text{C}$ матеріал сушили при температурі теплоносія 100°C до температури матеріалу 58°C . Потім температуру теплоносія зменшували до 65°C , при цьому температура матеріалу збільшилась до $58,44^\circ\text{C}$, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до $48,16^\circ\text{C}$, та подальшому збільшувалася до $62,6^\circ\text{C}$.

На рис. 4 представлена зміна швидкості сушіння гарбузово-хурмової суміші. Як видно з рис. 4 максимальна швидкість сушіння за режимом 100°C і

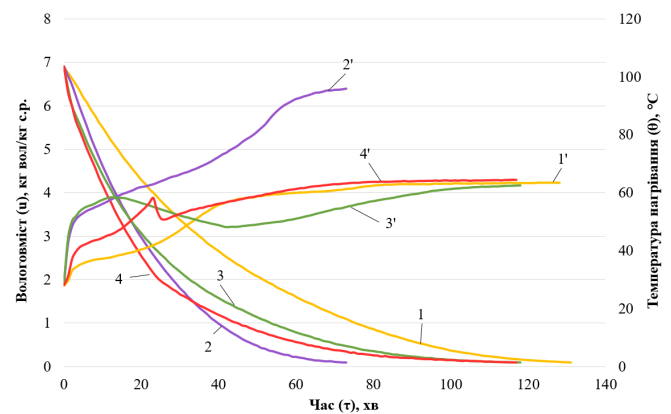


Рис. 3. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') суміші на основі гарбуза та хурми, товщина шару $\delta \approx 5\text{ мм}$:
1 – 65°C , 3 м/с; 2 – 100°C , 3 м/с; 3 – $100/65^\circ\text{C}$, 3 м/с;
4 – $3800\text{Вт/м}^2 + 65^\circ\text{C}$, 3 м/с

Fig. 3. Changes in moisture content (1, 2, 3, 4) and temperature within the layer (1', 2', 3', 4') of a mixture based on pumpkin and persimmon, layer thickness $\delta \approx 5\text{ mm}$:

1 – 65°C , 3 m/s; 2 – 100°C , 3 m/s; 3 – $100/65^\circ\text{C}$, 3 m/s
4 – $3800\text{W/м}^2 + 65^\circ\text{C}$, 3 m/s

становить 25,8 %/хв, найменша за режимом 65°C – 14,3%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м² +65 °C має максимальну швидкість сушіння 22,6 %/хв при увімкнених інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості з 11,5%/хв до 6,24%/хв і потім іде поступове зменшення. За ступеневим режимом 100/65 °C максимальна швидкість сушіння 24,8%/хв.

На рис. 5 представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння моркви. З рисунку 5 видно, при збільшенні температури теплоносія з 70 °C до 100 °C скорочує час сушіння гарбуза у 1,95 разів, при цьому швидкість зростає в 1,73 рази. При цьому збільшення температури теплоносія до 100 °C призводить до погіршення якості сушеної моркви, а саме потемніння матеріалу та підгорілого присмаку.

Далі були виконані дослідження морквяно-селерної суміші за режимами сушіння 60, 70, 80, 100, 100/70 °C швидкість теплоносія 3,5 м/с. Кінетика процесу сушіння морквяно-селерної суміші представлена на рис. 6.

З збільшенням температури теплоносія зменшується тривалість сушіння, так при температурі 60°C тривалість сушіння 125 хв., а вже при температурі 70°C – 80 хв., тобто зменшення тривалості складає 1,56 раз. Подальше збільшення температури на 10°C до температури 80°C приводить до зменшення тривалості

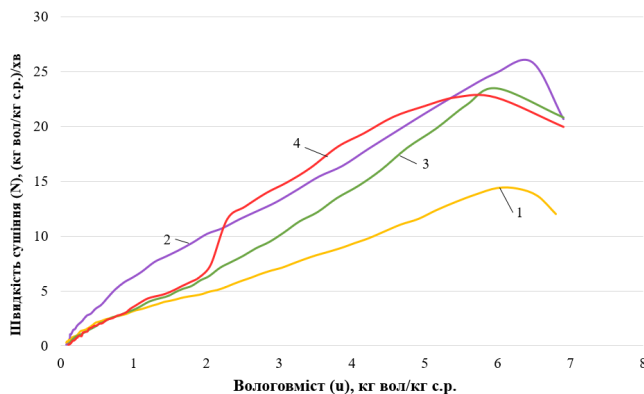


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) суміші на основі гарбуза та хурми в шарі $\delta \approx 5$ мм:

1 – 65 °C, 3 м/с; 2 – 100 °C, 3 м/с; 3 – 100/65 °C, 3 м/с;
4 – 3800 Вт/м² + 65 °C, 3 м/с

Fig. 4. Changes in the drying rate (1, 2, 3, 4) of a mixture based on pumpkin and persimmon in a layer $\delta \approx 5$ mm:

1 – 65 °C, 3 m/s; 2 – 100 °C, 3 m/s; 3 – 100/65 °C, 3 m/s;
4 – 3800 W/m² + 65 °C, 3 m/s

в 1,15 раз. При температурі 100°C сушіння морквяно-селерної суміші проходить найшвидше за 58 хв (рис. 7). При ступеневому режимі інтенсивність процесу досягається наступним чином: на початку сушіння на протязі 30 хв температура теплоносія складає 100 °C,

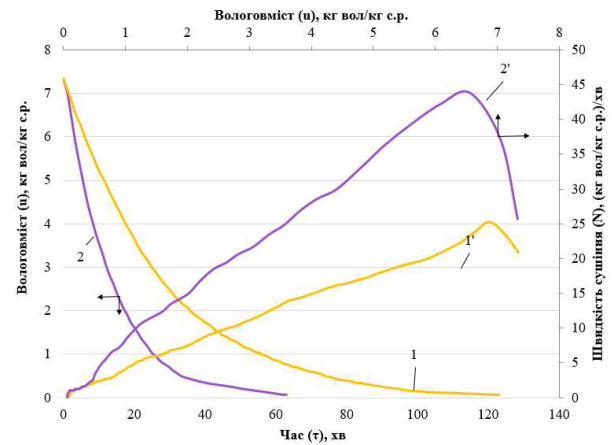


Рис. 5. Зміна вологовмісту (1, 2) та швидкості сушіння (1', 2') моркви в шарі $\delta \approx 10$ мм:

1 – 70 °C, 3,5 м/с; 2 – 100 °C, 3,5 м/с

Fig. 5. Changes in moisture content (1, 2) and drying rate (1', 2') of carrots in a layer $\delta \approx 10$ mm: 1 – 70 °C, 3.5 m/s; 2 – 100 °C, 3.5 m/s

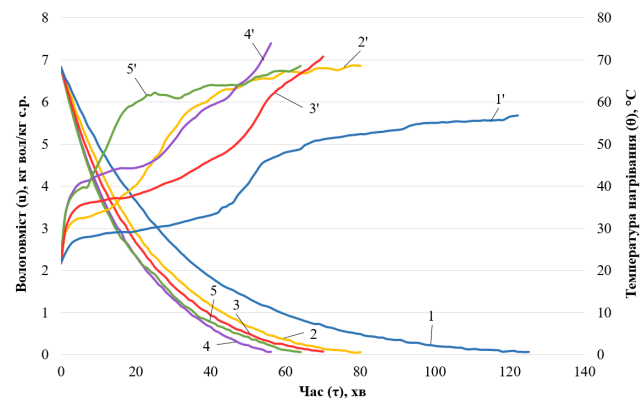


Рис. 6. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4, 5) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4', 5') морквяно-селерної суміші в шарі $\delta \approx 10$ мм:

1 – 60 °C, 3,5 м/с; 2 – 70 °C, 3,5 м/с; 3 – 80 °C, 3,5 м/с;
4 – 100 °C, 3,5 м/с; 5 – 100/70 °C, 3,5 м/с

Fig. 6. Changes in moisture content (1, 2, 3, 4, 5) and temperature within the layer (1', 2', 3', 4', 5') of carrot-celery mixture in a layer $\delta \approx 10$ mm:

1 – 60 °C, 3.5 m/s; 2 – 70 °C, 3.5 m/s; 3 – 80 °C, 3.5 m/s;
4 – 100 °C, 3.5 m/s; 5 – 100/70 °C, 3.5 m/s

потім коли температура матеріалу підвищується температуру знижують до 70 °С і підтримують на такому рівні до кінця процесу сушіння. Тривалість процесу за ступневим режимом 100/70 °С зменшується у 1,92 рази порівняно з 60 °С.

На кривих швидкості сушіння видно, що процес сушіння проходить наступні етапи: нагрівання до максимального значення швидкості сушіння і період падаючої швидкості сушіння до кінцевої вологості 6..10%. Максимальне значення швидкості при сушінні морквяно-селерної суміші настає при вологовміст 5,8-6,7 кг вол./кг с.р. % (рис. 7).

Максимальна швидкість сушіння морквяно-селерної суміші при температурі 100°С – 35,1%/хв., що у 1,7 разів більше за максимальну швидкість при температурі 60°С.

Вміст каротиноїдів в залежності від стану сировини представлено в таблиці 2. Як видно з таблиці 2 концентрація каротиноїдів в порошках збільшується приблизно у 5 разів, що пояснюється зменшенням вологи та концентрацією сухих речовин.

Порівнюючи якісні показники композиційних антиоксидантних сумішей за вмістом каротиноїдів, можна зробити висновок, що вони зберігають краще каротиноїди, ніж морквяний порошок після гіротермічної обробки на 6,3 – 9,6% (табл. 3).

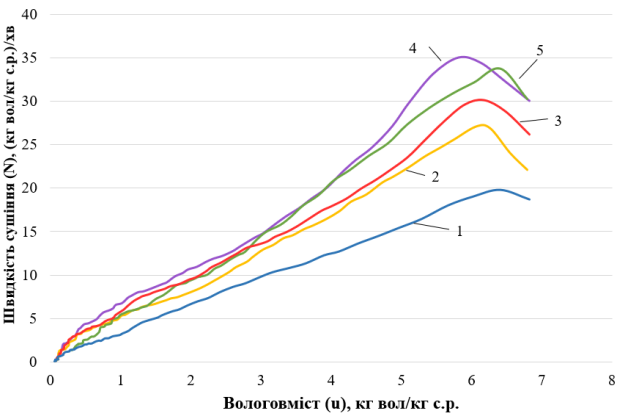


Рис. 7. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4, 5) морквяно-селерної суміші в шарі $\delta \approx 10$ мм:
1 – 60 °С, 3,5 м/с; 2 – 70 °С, 3,5 м/с; 3 – 80 °С, 3,5 м/с;
4 – 100 °С, 3,5 м/с; 5 – 100/70 °С, 3,5 м/с
Fig. 7. Changes in the drying rate (1, 2, 3, 4, 5) of carrot-celery mixture in a layer $\delta \approx 10$ mm:
1 - 60 °C, 3.5 m/s; 2 - 70 °C, 3.5 m/s; 3 - 80 °C, 3.5 m/s;
4 - 100 °C, 3.5 m/s; 5 - 100/70 °C, 3.5 m/s

Проведені дослідження впливу температури теплоносія на збереження каротиноїдів показало, що найбільш оптимальна температура сушіння морквяно-селерної суміші, виходячи з якісних характеристик, складає 70°С (табл. 3).

Збільшення температури теплоносія до 80°С зменшить тривалість сушіння на 10 хв., при цьому також зменшується збереження каротиноїдів в порівнянні з температурою 70°С на 4,5%. Підвищення температури до 100°С призводить до істотного зменшення каротиноїдів і становить 33,2%.

Найкращі результати збереження каротиноїдів отримані при тепловому режиму сушіння 70 °С і становлять 90 – 93%. Ступінчастий режим сушіння забезпечує збереження каротиноїдів на рівні 87 – 90%. При цьо-

Таблиця 2. Вміст каротиноїдів в залежності від виду каротиновмісної сировини

Table 2. Carotenoid content depending on the type of carotene-containing raw materials

Вид сировини	Сировина	Волога, %	Сума каротиноїдів, мг %
Морква	Свіжа морква	85,0	19,2
	Порошок із моркви	4,0	139,7
Гарбуз	Свіжий гарбуз	86,3	2,6
	Порошок із гарбуза	8,0	19,5

Таблиця 3. Вплив температури теплоносія на збереження каротиноїдів в антиоксидантних сумішах на основі моркви

Table 3. Influence of coolant temperature on the preservation of carotenoids in carrot-based antioxidant mixtures

Назва антиоксидантного порошку	Температура теплоносія, °С	Каротиноїди (% збереження)
Морквяний (після гіротермічної обробки)	60	84,1
	70	88,3
	80	84,6
	100	21,5
Морквяно-селерний	60	87,7
	70	95,6
	80	91,1
	100	33,2

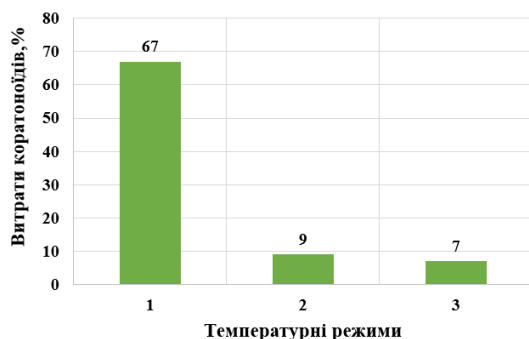


Рис. 8. Втрати каротиноїдів у морквяно-селерної суміші в залежності від режиму сушіння :

1 – 100 °C; 2 – 100/70°C; 3 – 70°C

Fig. 8. Loss of carotenoids in carrot-celery mixture depending on the drying mode:

1 - 100 °C; 2 - 100/70 °C; 3 - 70 °C

му антиоксидантна суміш на вигляд за кольором не відрізняється від початкової сировини. Навіть різниця в 3% збереження каротиноїдів між режимами 70 та 100/70°C, все ж таки надає перевагу ступінчатому режиму з огляду на значну інтенсифікацію процесу сушіння.

Висновки

Досліджено кінетику сушіння гарбуза, моркви та сумішей на їх основі, а саме гарбузово-хурм'яного та морквяно-селерного. Результати показують, що для сушіння гарбузово-хурм'яного порошку доцільно використання комбінованого 3800Вт/м² +65 °C та ступеневого режиму 100/65 °C, дають можливість скоротити тривалість процесу сушіння у 1,11 разів порівняно з режимом 65 °C, та зберегти яскравий оранжевий колір в порівнянні з режимом 65 °C.

Для сушіння морквяно-селерного порошку доцільно також використовувати ступеневий режим 100/70 °C за якого тривалість процесу зменшується у 1,92 рази порівняно з 60 °C.

За результатами визначено, що оптимальні режими дають зберегти високу кількість каротиноїдів порошків. Також сушіння дає можливість концентрувати каротиноїди у сухих порошках приблизно у 5 разів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Doymaz L. Drying behavior of green beans, Journal of Food Engineering, 2005, 69, 161-165.
2. Inyang U., Oboh I., Etuk B. Drying and the different techniques. International Journal of Food Nutrition and Safety, 2017, 8(1), 45-72.

3. Adeboye O.C., Oputa C.O. Effect of galex on growth and fruit nutrient composition of okra. Journal of Agriculture, 1996, 18 (1/2), 1-9.

4. Bamire A.S., Oke J.T. Profitability of vegetable farming under rainy and dry season production in South-Western Nigeria. Journal of Vegetable Crop Production, 2003, 9, 11-18.

5. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Гусарова О.В. Інтенсивні способи сушіння яблучних слайсів з конвективним та комбінованим енергопідведенням. Теплофізика та Теплоенергетика, 2024, 46(4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1>

6. Owolarafe O.K., Muritala O.A., Ogunsina B.S. Development of an okra slicing device, Journal of Food Science and Technology, 2007, 44 (4), 426-429.

7. Okos M.R., Campanella O., Narsimhan G., Singh R.K., Witnauer A.C. Food dehydration. In D.R. Heldman and D.B. Lund (Eds) Handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker, 1992, 601 -744.

8. Essa M.M., Bishir M., Bhat A. et al. Functional foods and their impact on health. J Food Sci Technol, 2023, 60, 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>.

9. Rane B. R., Amkar A. J., Patil V. S., Vidhate P. K., Patil A. R. Opportunities and Challenges in the Development of Functional Foods and Nutraceuticals. Formulations, Regulations, and Challenges of Nutraceuticals, 2025, 227-254.

10. Zannou O., Oussou K. F., Chabi I. B., Alamou F., Awad N. M., Miassi Y. E., et al. Phytochemical and nutritional properties of sumac (Rhus coriaria): a potential ingredient for developing functional foods. Journal of Future Foods, 2025, 5(1), 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.002>.

11. Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. Pharmacognosy reviews, 2010, 4(8), 118. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>.

12. Halliwell B. How to characterize an antioxidant-An update. Biochem Soc Symp, 1995, 61, 73–101. doi: 10.1042/bss0610073

13. Shi HL, Noguchi N, Niki N. Comparative study on dynamics of antioxidative action of α- tocopheryl hydroquinone, ubiquinol and α- tocopherol, against lipid peroxidation. Free Radic Biol Med, 1999, 27, 334–46. doi: 10.1016/s0891-5849(99)00053-2

14. Levine M, Ramsey SC, Daruwara R. Criteria and recommendation for Vitamin C intake. JAMA, 1991, 281, 1415–23. doi: 10.1001/jama.281.15.1415.

15. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene, *Nutrients*, 2019, 11, 1093.
16. Петрова Ж.О., Новікова Ю.П., Слободянюк К.С., Граков О.П., Коваль І.О. Переробка хурми (*Diospyros kaki* L.) сушінням. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 19-29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955>
17. Sun T, Rao S, Zhou X, Li L. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Mol Horti*, 2022, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>
18. Sun Y, Hu P, Jiang Y et al. Comprehensive analysis of metabolomics and transcriptomics reveals varied tepal pigmentation across *Gloriosa* varieties. *BMC Plant Biol*, 2025, 25, 66. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06067-y>
19. Arshad Z, Ashraf N, Ali A, Iqbal A, Rafique M, Gulzar M, Ahmad A, Hassan SA. Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. *Food Science and Engineering*, 2025, 6(1), 87-102.
20. Al-Anoos I, El-dengawy R, Hasanin H. Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed varieties. *Journal of Plant Science & Research*, 2015, 2(2), 1-4.
21. Islam M, Jothi JS, Habib MR, Iqbal A. Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 2014, 1(07), 1091-1097.
22. Piepiórka-Stepuk J, Wojtasik-Kalinowska I, Sterczyńska M, Mierzejewska S, Stachnik M, Jakubowski M. The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 175, 114469.
23. Mia S., Bulbul M. T. A., Hasan T., Sheikh M. H., Haque M. T. Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. *Tropical Agroecosystems (TAEC)*, 2024, 5(2), 78-81. <http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81>
24. Hyun J.-E. et al Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (*Diospyros kaki* Thunb.) Stored at Various Temperatures. *Journal of Food Quality*, 2019, Volume 2019, Issue 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/6256409>.
25. Снежкін Ю.Ф., Шанар Р.О. Енергоефективне обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2020, 42(2), 5-17. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.1>
26. Phoosomma P., Korbuakaew K. Innovative Hybrid Food Processing Drying Chambers. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2024, vol. 11, no. 12, pp. 302-307. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P128>
27. Jongyingcharoen J. S., Naweera W., Sangruangnak S., Assawadejmethakul A. Determination of Effective Moisture Diffusivity Considering Shrinkage for Vibration-Assisted Infrared Drying of Pumpkin. In *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, 2025,. Vol. 150, p. 03001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515003001>
28. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and Ultrasound Assisted Rotary Drying of Carrot: Analysis of Process Kinetics and Energy Intensity. *Applied Sciences*, 2024, 14(22), 10676. <https://doi.org/10.3390/app142210676>
29. Kumar H. P., Radhakrishna K., Nagaraju P. K., Rao D. V. Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2001, 25(6), 447-460. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2001.tb00472.x>
30. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
31. Ткаченко С. Й., Снівак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 76 с.
32. Снежкін Ю.Ф. Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Гідротермічна обробка функціональної. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 2012, вип. 41, т.1, 13 – 18.

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN THE PRODUCTION OF COMBINED CAROTENE-CONTAINING PRODUCTS

Petrova Zh.O.¹, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Grakov D.P.²**, PhD student

¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, professor, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, , grakov.d@gmail.com*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.3>

Today, the world is trying to solve the problem of processing food plant material using existing drying methods to preserve biologically active substances. At the same time, drying is a complex energy-intensive process. And in the future, the problem of reducing energy consumption for drying processes arises. Therefore, there is an urgent need to create and implement modern energy-efficient thermal technologies that reduce energy consumption for drying processes and allow retaining micro- and macroelements in the dry product. A sufficient amount of micro- and macronutrients in foods that enrich the human body can reduce the risk of chronic diseases, improve physical health and mental well-being.

Carotenoids, which are classified as antioxidants, are the most common biologically active substances. They represent a significant potential in the food, cosmetics and pharmaceutical industries. Carotenoids are a class of terpenoid pigments that are mainly responsible for the bright yellow, orange and red colours of plant fruits and flowers.

The most common carotenoids in Ukraine are pumpkin and carrot. They are widely cultivated around the world due to their rich content of vitamins, minerals, fibre and antioxidant properties. Pumpkin and carrots are seasonal products and have a shelf life that can be extended by preservation, namely drying.

Convective drying is one of the best methods for drying carotene-containing materials, but it has a predominantly long duration, which must be reduced to better preserve functional properties. Therefore, **the aim of this work** is to study combined drying methods to reduce the duration.

In this work, the drying of pumpkin, carrot and mixtures based on them, namely pumpkin-persimmon and carrot-celery, was studied on an experimental convective stand.

The results show that for drying pumpkin-persimmon powder, it is advisable to use a combined 3800W/m² +65 °C and a step mode of 100/65 °C, which make it possible to reduce the drying process duration by 1.11 times compared to the 65 °C mode and preserve a bright orange colour compared to the 100 °C mode. For drying carrot and celery powder, it is also advisable to use a step mode of 100/70 °C, at which the process duration is reduced by 1.92 times compared to 60 °C.

According to the results, it was determined that the optimal modes make it possible to maintain a high amount of carotenoids in powders. At the same time, the concentration of carotenoids in dry powders increases by about 5 times.

Key words: convective drying, infrared radiation, efficient drying modes, carotenoids, pumpkin, carrot.

References 32, figure 8, table 3.

1. Doymaz L. Drying behavior of green beans, *Journal of Food Engineering*, 2005, 69, 161-165.
2. Inyang U., Oboh I., Etuk B. Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2017, 8(1), 45-72.
3. Adeboye O.C., Oputa C.O. Effect of galex on growth and fruit nutrient composition of okra. *Journal of Agriculture*, 1996, 18 (1/2), 1-9.
4. Bamire A.S., Oke J.T. Profitability of vegetable farming under rainy and dry season production in South-Western Nigeria. *Journal of Vegetable Crop Production*, 2003, 9, 11-18.
5. Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V. Intensyvni sposoby sushinnia yabluchnykh slaisiv z konvektyvnyy ta kombinovanyy enerhopidvedenniam [Intensive methods of drying apple slices with convective and combined energy supply]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 2024, 46(4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1> (in Ukr.).
6. Owolarafe O.K., Muritala O.A., Ogunsina B.S. Development of an okra slicing device, *Journal of Food Science and Technology*, 2007, 44 (4), 426-429.
7. Okos M.R., Campanella O., Narsimhan G., Singh R.K., Witnauer A.C. Food dehydration. In D.R. Heldman and D.B. Lund (Eds) *Handbook of food engineering*. New York: Marcel Dekker, 1992, 601 -744.
8. Essa M.M., Bishir M., Bhat A. et al. Functional foods and their impact on health. *J Food Sci Technol*, 2023, 60, 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>.
9. Rane B. R., Amkar A. J., Patil V. S., Vidhate P. K., Patil A. R. Opportunities and Challenges in the Development of Functional Foods and Nutraceuticals. *Formulations, Regulations, and Challenges of Nutraceuticals*, 2025, 227-254.

10. Zannou O., Oussou K. F., Chabi I. B., Alamou F., Awad N. M., Miassi Y. E., et al. Phytochemical and nutritional properties of sumac (*Rhus coriaria*): a potential ingredient for developing functional foods. *Journal of Future Foods*, 2025, 5(1), 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.002>.
11. Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*, 2010, 4(8), 118. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>.
12. Halliwell B. How to characterize an antioxidant—An update. *Biochem Soc Symp*, 1995, 61, 73–101. doi: 10.1042/bss0610073
13. Shi HL, Noguchi N, Niki N. Comparative study on dynamics of antioxidative action of α -tocopheryl hydroquinone, ubiquinol and α -tocopherol, against lipid peroxidation. *Free Radic Biol Med*, 1999, 27, 334–46. doi: 10.1016/s0891-5849(99)00053-2
14. Levine M, Ramsey SC, Daruwara R. Criteria and recommendation for Vitamin C intake. *JAMA*, 1991, 281, 1415–23. doi: 10.1001/jama.281.15.1415.
15. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene, *Nutrients*, 2019, 11, 1093.
16. Petrova Zh.O., Novikova Yu.P., Slobodianiuk K.S., Hrakov O.P., Koval I.O. Pererobka khurmy (*Diospyros kaki* L.) sushinniam [Processing of persimmon (*Diospyros kaki* L.) by drying]. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 19–29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955> (in Ukr.).
17. Sun T, Rao S, Zhou X, Li L. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Mol Hort*, 2022, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>
18. Sun Y., Hu P., Jiang Y. et al. Comprehensive analysis of metabolomics and transcriptomics reveals varied tepal pigmentation across *Gloriosa* varieties. *BMC Plant Biol*, 2025, 25, 66. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06067-y>
19. Arshad Z, Ashraf N, Ali A, Iqbal A, Rafique M, Gulzar M, Ahmad A, Hassan SA. Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. *Food Science and Engineering*, 2025, 6(1), 87–102.
20. Al-Anoos I, El-dengawy R, Hasanin H. Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed varieties. *Journal of Plant Science & Research*, 2015, 2(2), 1–4.
21. Islam M, Jothi JS, Habib MR, Iqbal A. Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 2014, 1(07), 1091–1097.
22. Piepiórka-Stepuk J, Wojtasik-Kalinowska I, Sterczyńska M, Mierzejewska S, Stachnik M, Jakubowski M. The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 175, 114469.
23. Mia S., Bulbul M. T. A., Hasan T., Sheikh M. H., Haque M. T. Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. *Tropical Agroecosystems (TAEC)*, 2024, 5(2), 78–81. <http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81>
24. Hyun J.-E. et al Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (*Diospyros kaki* Thunb.) Stored at Various Temperatures. *Journal of Food Quality*, 2019, Volume 2019, Issue 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2019/6256409>.
25. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. Enerhoefektyvne obladnannia dlia znevodnennia termolabilnykh materialiv [Energy-efficient equipment for dehydration of thermolabile materials.]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 2020, 42(2), 5–17. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.1> (in Ukr.).
26. Phoosomma P., Korbuakaw K. Innovative Hybrid Food Processing Drying Chambers. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2024, vol. 11, no. 12, pp. 302–307. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P128>
27. Jongyingcharoen J. S., Naweera W., Sangruangnak S., Assawadejmethakul A. Determination of Effective Moisture Diffusivity Considering Shrinkage for Vibration-Assisted Infrared Drying of Pumpkin. In *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, 2025. Vol. 150, p. 03001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515003001>
28. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and Ultrasound Assisted Rotary Drying of Carrot: Analysis of Process Kinetics and Energy Intensity. *Applied Sciences*, 2024, 14(22), 10676. <https://doi.org/10.3390/app142210676>
29. Kumar H. P., Radhakrishna K., Nagaraju P. K., Rao D. V. Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2001, 25(6), 447–460. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2001.tb00472.x>
30. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159–166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
31. Tkachenko S. Y., Spivak O. Yu. Sushylni protsesy ta ustanovky. Navchalnyi posibnyk [Drying processes and installations. Study guide]. Vinnytsia: VNTU, 2007. 76 s. (in Ukr.).
32. Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Paziuk V.M. Hidrotermichna obrobka funktsionalnoi [Hydrothermal treatment of functional]. *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii*, 2012, 41, 1, 13 – 18. (in Ukr.).

Отримано 30.01.2025

Received 30.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025